プラスチック射出成形金型における Cu-Be 合金インサート材形状の自動生成*

高峰** 是澤宏之*** 榎原弘之*** 鈴木 裕***

Automatic Shape Generation of Cu-Be Alloy Inserts in Plastic Injection Molds

Feng GAO, Hiroshi KORESAWA, Hiroyuki NARAHARA and Hiroshi SUZUKI

Cu-Be alloy, whose thermal conductivity is 3 to 10 times higher than the common mold steels, has been identified as an effective material for improving the cooling uniformity of resin when applied it to plastic injection molds as inserts. However, arranging an optimum shape and size of the Cu-Be alloy into a mold is still one of the major problems in using this technology. In this paper, an evaluation method of cooling uniformity to a resin product is proposed by observing the temperature distribution and its variation on the resin surface. This method can be used for judging the validity of a cooling system inside an injection mold, such as the layout of cooling channels, or the shape and the arranging location of a embedded Cu-Be alloy block. This can be realized by comparing the result values gained from a defined evaluation function. Simultaneously, by making the evaluation value to converge to the minimum, a procedure is provided for the automatic search of the Cu-Be block from an arbitrarily assigned initial arrangement to the optimum shape. Furthermore, case studies are presented to discuss the process of realizing the automatic shape generation of Cu-Be alloy inserts based on numerical analysis.

Key words: plastic injection mold, mold cooling, cooling uniformity, Cu-Be alloy, thermal conductivity, automatic shape generation, unsteady heat transfer, numerical analysis

1. 緒 言

プラスチック射出成形金型の冷却は、金型のキャビティ内に充填された熔融樹脂の持つ熱量が金型側に伝達され、樹脂を固化させる工程である。これは、金型内に配置された冷却管、あるいは高熱伝導材などの冷却システムにより実現される。このため、冷却システムの設計が不適切な場合、不均一な冷却が発生し、樹脂の各部分にソリ、ヒケなどの成形不良が発生する。そのために、樹脂を均一に冷却できる冷却システムの設計が重要となる。

冷却システムの一つとして、熱伝導率の高い Cu-Be 合金^{1)~3)}を用いる方法がある。Cu-Be 合金は、一般的な金型用鋼材と比較して、数倍の熱伝導率を持つ材料である。同時に、材料強度も比較的に高いことから、金型の構成部材として成形時に高い圧力の作用するキャビティの表面にも適用可能である。このため、加工あるいは金型構造の制限から、冷却管の配置が困難な箇所や、金型内の熱の集中する部分に対して、Cu-Be 合金を配置することによって、不均一な冷却状態を改善できることが確認⁴⁾⁵⁾されている。しかしながら、Cu-Be 合金を効果的に使用するには、その形状および配置場所による樹脂の冷却状態への影響の把握が重要となる。現状において、これは主に設計者の経験に依存するため、Cu-Be 合金を十分に生かした設計が実現できていないと言え難い。加えて、この様な設計では、高価な Cu-Be 合金を過剰に配置する場合も多く、材料の浪費とコストの高騰を招くことにもつながる。

特にこのことは、前例のない新しい金型を設計する際に顕著になる。したがって、明確な設計指針に基づいて、Cu-Be 合金の最適な形状および配置場所を効果的に決定する方法が必要となる。

本研究は、Cu-Be 合金を冷却システムに用いて、キャビティ内の樹脂の冷却を均一化するための Cu-Be 合金の形状および配置場所の自動生成を目的とする。研究対象の射出成形金型の設計において、冷却中の樹脂の温度分布は時間に伴って変化するため、樹脂および金型の温度変化を非定常熱伝導として扱い、これを数値解析によって得る。以下に手順を示す。まず、冷却過程におけるキャビティ内の樹脂の表面温度分布および冷却中の時間の变化から、樹脂の均一な冷却に関する評価方法を提案する。この評価は、新たに定義した評価関数によって行う。次に、この評価関数によって得られる値が最小値となるまで、Cu-Be 合金の形状を変化させることによって、最も均一な冷却状態を実現する Cu-Be 合金の形状、サイズおよび配置場所の探索および決定を行う。これらの処理に数値解析を用いて解析し、本研究における自動生成手法の有用性を確認したので報告する。

2. 樹脂の冷却均一性の評価

2.1 均一な冷却

キャビティ近傍の温度分布、あるいは冷却設計と熱の流れとの関係によって、樹脂を均一に冷却するためには、幾つかの設計指針⁶⁾⁷⁾が存在する。これらは、具体的な設計事例に依存したり、樹脂の冷却状態を直接に反映しないため、冷却を評価するための基準として利用するには困難である。よって、ここでは樹脂の表面温度分布が樹脂の固化過程に与える影響に基づいて、樹脂の均一な冷却について考察する。

* 原稿受付 平成 13 年 8 月 9 日

** 学生会員 九州工業大学大学院 (飯塚市川津 680-4)

*** 正 会 員 九州工業大学情報工学部

冷却過程において、樹脂の持つ熱量が金型に伝わる時、キャビティ表面と接する樹脂の表面が重要となる。樹脂の表面における温度分布の状態および冷却時間に対する変化が、熔融樹脂の固化や収縮挙動を決定する。一般的に、射出成形品の形状は、均一な肉厚をもつ構造であるから、樹脂の表面の温度を冷却中の各瞬間ごとに均一な分布状態として保つことができれば、樹脂の表面から中心に向かっての樹脂の固化あるいは収縮挙動が、成形品の断面形状の中心軸に対称となるような応力分布として得られるため、成形不良を低減させることが可能になると考えられる。その反面、不均一な樹脂の表面の温度分布が発生した場合は、冷却による樹脂の収縮と内部応力の分布にアンバランスを生じさせるため、取り出し後に、成形品の変形やソリなどの成形不良の原因になる。これにより、本研究では、冷却過程での樹脂の表面温度分布の時間的な変化に伴うばらつきが最も少ない場合をもって、樹脂の均一な冷却状態が実現できたとする。

2.2 評価曲線

図1に、二次元での評価モデルを示す。金型内に厚さの均一な成形品を成形するためのキャビティ空間があり、その空間に熔融樹脂を充填する。キャビティ近傍には、冷却の役割を担う Cu-Be 合金のブロックが配置されている。

Fig.1 Evaluation model for cooling uniformity

本論文における冷却の均一性の評価は、キャビティと接する樹脂の表面で行う。まず、表面の温度分布を求め、表面上の任意の点 P (以後、評価点とよぶ) をとる。次に、評価点を含み、冷却の均一性を評価する範囲 L (以後、評価曲線とよぶ) をとる。冷却過程における各評価点の温度に基づいて、評価曲線上の温度分布のばらつきを求め、樹脂の冷却の均一性を評価する。評価曲線の範囲は、冷却に対する設計的な要求あるいは金型内の熱の集中する場所を考慮して、樹脂の表面全体あるいは一部分となる。

2.3 評価関数

二次元における非定常熱伝導解析に基づいて樹脂の表面温度分布を得た後、冷却の均一性の評価に関する評価関数を以下に定義する。

まず、評価点の温度誤差を求める。冷却途中の任意の時間 τ における評価曲線 L 上にある評価点 P の温度誤差 e_p を式 (1) より求める。

$$e_p = T_p - \frac{1}{L} \int_0^L T(l) dl \quad (1)$$

ここで、 T_p は評価点 P の温度、 L は評価曲線の長さ、 $T(l)$ は評価曲線の始点からの距離を変数 l とする樹脂の表面上の温度分布関数、 dl は l の微小距離である。なお、式 (1) の右辺第 2 項は冷却途中の任意の時間 τ における評価曲線上の平均温度となる。

次に、冷却途中の任意の時間 τ における評価曲線上の温度分布のばらつきを計算する。温度分布のばらつきは、評価

曲線上の全ての評価点の温度誤差 $e_p(l)$ の二乗をとり、これを評価曲線に沿って積分することで得られる値 E として、式 (2) に定義する。

$$E = \frac{1}{L} \int_0^L e_p^2(l) dl \quad (2)$$

E は、冷却過程における、ある瞬間 τ でのばらつきである。これを $E(\tau)$ として、冷却開始から終了までの全ての冷却過程にわたり積分することによって、時間的な冷却の均一性を表す評価関数 F として式 (3) に定義する。

$$F = \frac{1}{\tau_c} \int_{\tau_0}^{\tau_c} E^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

ここで、 τ_0 は冷却の開始時間、 τ_c は冷却の終了時間、 $d\tau$ は微小時間である。式 (3) により得られる値は、冷却過程における空間的かつ時間的な温度分布の偏差の情報を含む。これより、その値 F が小さい程、冷却中の樹脂の表面温度の降下する状態は、均一な状態であることを意味し、樹脂の均一な冷却状態を表す。なお、評価関数 F によって得られる値は、その他の冷却システムの設計においても冷却の均一性を判断する指標として使用可能である。

3 Cu-Be 合金の自動生成

前節で定義した評価関数 F を用いて、金型内に Cu-Be 合金の形状を自動生成させる。まず、制約条件の範囲を定義し、次に、Cu-Be 合金の初期形状と初期配置を与えた後、評価関数 F によって得られる値を最小とする Cu-Be 合金の形状および配置場所を自動的に探索し、最適な形状および配置場所を決定する。

図2に、自動配置の流れを示す。右図は、金型と成形品の断面図による自動配置の概念図である。なお、Cu-Be 合金の配置領域は、熱の集中する領域と想定される成形品の内側の領域 MNSA とする。

a) 制約条件の設定

Cu-Be 合金の形状や配置する範囲は、金型の構造、加工条件あるいは設計者の要求などから、なんらかの制約条件を付与される場合がある。例えば、加工の容易さから、Cu-Be 合金の形状が長方形となるような場合である。

b) Cu-Be 合金の初期配置および初期形状の設定

Cu-Be 合金のブロックを金型の指定範囲内に配置する。この時、合金形状の境界線を $b_0(x, y)$ で表す。

c) 均一な冷却を実現する Cu-Be 合金形状の自動探索

初期配置した Cu-Be 合金のブロックに対して、式 (3) で定義した評価関数 F を用いて、冷却均一性を評価する。勾配法によりその値が小さくなる方向へ境界線 $b_0(x, y)$ 上の各構成点を一定量移動させ、新しい境界線 $b_1(x, y)$ を得る。この処理を評価関数の値が最小に収束するまで、合金の境界線 $b(x, y)$ を変化させることにより、繰り返す。この過程を式 (4) に表す。

$$F(b(x, y)) \rightarrow \min \quad (4)$$

d) 収束の判定

自動生成より得られる新しい形状の収束状態を判定するために、式 (5) を用いる。

$$|F_n - F_{n-1}| < \epsilon \quad (5)$$

ここで、 F_n および F_{n-1} は、第 n ステップおよび第 $n-1$ ステップにおける評価関数 F による値であり、 ε は収束計算に用いる解析の精度である。 F_n と F_{n-1} の差の絶対値が ε より小さくなった場合、 F は最小値に収束したとして、(e) に進み、そうではない場合は、(c) に戻り、式 (5) を満足するまで、(c) から (d) の処理を繰り返す。なお、(c) から (d) の処理を終了するごとに、解析のステップを 1 つ更新する。

- e) 自動配置による Cu-Be 合金の最終形状の確定
この時の Cu-Be 合金の境界線 $b_w(x, y)$ をもって、最適な形状および配置とする。

4. 数値実験

4.1 解析モデル

図 3 に、数値実験に使用する金型と解析モデルを示す。図 3(a) は、想定した箱形の成形品形状とこれを成形する金型である。解析を簡略化するため、図 3(b) に示す様に、面 ABCD の解析断面を選択する。面 AD は熱的に平衡であることから、断熱面とする。Cu-Be 合金は成形品の内側である可動型側の領域 MNSA に配置し、冷却管は一般的に加工可能な場所に固定する。

表 1 に、非定常熱伝導の数値解析に用いた各種の物性値を示す。使用する Cu-Be 合金の熱伝導率は金型鋼材の 3 倍であり、使用する樹脂は ABS を想定する。充填直後の樹脂の温度を 210°C とし、樹脂内部の最高温度が 105°C 以下になった場合、樹脂は固化したとする。冷却液は 40°C の水を使用する。金型の表面温度は 60°C とする。

数値解析は次の仮定条件により行う。a) キャビティに充填直後の樹脂全体の温度は一定とする。b) 冷却過程において、樹脂は発熱しない。c) Cu-Be 合金と金型の間に接触熱抵抗は存在しない。d) 冷却水の温度、金型周囲の空気温度および射出成形機と金型の接触する部分での温度は定常とする。

なお、評価曲線は樹脂の表面に沿った範囲 (MNOPQR) とする。非定常熱伝導解析は差分法を用い、時間の刻み間隔は 0.005 秒とする。自動生成での収束判定に使用する ε は、計算時間や解の収束性等を考慮して経験的に決定し、本解析では 1×10^{-3} と設定する。

4.2 冷却効果に対する評価関数の検討

Cu-Be 合金の冷却効果に対する評価関数の検討を行うため、実際の金型設計で多く採用されるブロック状の Cu-Be 合金を用いた場合と Cu-Be 合金を使用せず通常金型用鋼材のみを使用した場合による比較検討を行う。図 3(b) に示すように、金型の可動部分の配置領域 MNSA 内に、 $16\text{mm} \times 16\text{mm}$ の正方形の Cu-Be 合金を配置する。

図 4 に、Cu-Be 合金を配置した場合と金型用鋼材のみの場合における冷却過程の変化と評価関数によって得られた値を示す。図中、横軸は図 3(b) に示したモデルの点 M を起点として樹脂の表面に沿って MNOPQR の順に展開した距離であり、縦軸は温度である。

冷却中の樹脂の表面温度分布は、射出直後の平坦な直線的な温度分布から、冷却の進行に伴って、点 N、点 O、点 P および点 Q に温度ピークをもつ温度分布となり、その後、冷却の終了状態に近づくに従って、次第に平坦な曲線となる。金型用鋼材のみの場合と比較して、Cu-Be 合金を使用した場合は、合金を配置した領域の樹脂の表面 (MNO 部分) の温度分

Fig.2 Procedure of Cu-Be alloy automatic arrangement

Fig.3 Analysis model

Table.1 Molding conditions and properties

Resin (ABS)	Filling temperature	$^\circ\text{C}$	210.0
	Ejecting temperature(center)	$^\circ\text{C}$	105.0
	Thermal conductivity	$\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$	0.251
Coolant (Water)	Temperature	$^\circ\text{C}$	40.0
	Thermal diffusivity	$\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$	8.36×10^3
Cooling channel	Diameter	mm	4.0
Mold (Steel:NAK80)	Surface temperature	$^\circ\text{C}$	60.0
	Thermal conductivity	$\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$	41.8
	Specific heat	$\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	502
	Density	kg/m^3	7.8×10^3
Cu-Be alloy	Thermal conductivity	$\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$	125
	Specific heat	$\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	418
	Density	kg/m^3	8.75×10^3

Fig.4 Temperature distribution on product surface

Fig.5 Automatic arrangement from a rectangle initial shape

布に顕著な変化が認められ、より均一な冷却が実現されている。反面、成形品の外側である樹脂の表面 (PQR 部分) の温度分布では、ほとんど同一であったことから、合金の使用による効果は存在しないと考えることができる。

また、評価関数による値 F に関して、金型用鋼材のみの場合と比較して、Cu-Be 合金を使用した場合の値が小さい値となっていることから、評価関数による均一な冷却の評価が可能であることを確認した。

なお、温度ピークに関しては、点 N では熱の集中による温度の上昇を、点 O、点 P および点 Q では過冷却な状態による温度の低下を意味する。これらの点は、成形品の形状に依存し、他の部分とは異なる熱の流れとなる場所でもあるため、温度ピークを大きく改善することは、基本的に困難な場所でもある。

4.3 形状制限がない場合の自動配置

第 3 節で示した Cu-Be 合金の自動生成の手順を用いて、樹脂の表面に関して冷却の均一化を実現する最適な Cu-Be 合金の形状を探索する。ここでは、求める Cu-Be 合金の形状に対して、形状的な制限を与えない場合についての数値実験を行う。図 3(b) に示したモデルの領域 MNSA の中に、キャビティ表面を一部分にもつ長方形の Cu-Be 合金ブロックを初期形状として配置する。

図 5 に、自動配置の過程における Cu-Be 合金の形状および評価関数の値の変化を示す。図 5(a) は、初期配置の状態 (ステップ 0) であり、合金の形状は、7mm × 7mm の正方形であり、評価関数の値 F は 2885 であった。ステップの増加に伴って、Cu-Be 合金の面積は増加し、その形状は初期の正方形から自由な形状へと変形することを確認した。ステップ 110 のとき、評価関数の値 F は、2715 で収束し、図 5(d) に示すような、Cu-Be 合金の形状が得られた。

Fig.6 Automatic arrangement from an arbitrary initial shape

Fig.7 Temperature distribution on product surface

また、本手法の収束性を確認するため、同一の配置領域内の異なる位置に任意形状の境界線を持つ Cu-Be 合金を初期形状として配置し、数値実験を実行した。

図 6 に、形状および評価関数の値 F の変化を示す。先の場合と同様に、数値実験の開始から、Cu-Be 合金の境界線は変化し、その範囲は点 N の方向に移動した。最終的に、境界線は、キャビティ表面に到達し、キャビティ表面を構成する一部分となった。図 5(b) に示すように、この例では、145 ステップで収束し、評価関数の値 F は 2713 となった。得られた最終的な Cu-Be 合金の形状は、先に実行した例と非常に類似した形状となり、合金の使用量もほぼ同一であった。

図 7 に、合金の形状に制約条件を与えない Cu-Be 合金を用いた冷却過程における温度分布の変化と評価関数の値 F を示す。なお、Cu-Be 合金の配置によって樹脂の表面温度分布に変化を与える範囲として、評価曲線上の MNO 部分のみを示す。また比較のため、前節で実行した、金型用鋼材のみを使用した場合と 16mm × 16mm の Cu-Be 合金のブロックを配置した場合の温度分布の変化もグラフ中に合わせて示す。

合金の形状に制約条件を与えない Cu-Be 合金による 2 例における温度変化は、ほぼ同一であり、最大の温度差は、0.032 °C 程度であった。

また、図中、冷却開始から 3 秒後、10 秒後および 30 秒後の冷却過程における評価曲線上の MN 部分における温度変化の拡大図からも確認できるように、金型用鋼材のみを使用した場合と 16mm × 16mm の Cu-Be 合金のブロックを配置した場合の温度分布と比較して、最適化された Cu-Be 合金の形状は、より平坦な温度分布が得られていることから、より均

一な温度分布を実現し、評価関数の値 F も低い値を示した。また、16mm × 16mm の Cu-Be 合金と比較して、約 59.8% 程度の使用量で均一な冷却を実現したことから、冷却効果の高い Cu-Be 合金の配置を実現したと言える。得られた Cu-Be 合金の形状の特徴として、その境界線が、不規則かつ凸凹とした曲線状となっている。これは、金型用鋼材と Cu-Be 合金との表面積を増加させることによって熱交換の効率を高めたと考えられる。

任意の初期形状から探索を開始した Cu-Be 合金の最終形状は、大局的にほぼ類似の形状になる様に収束したが、その局所的な部分における形状は異なったものとなる。これは、小さな範囲内での局所解の発生を意味する。また、Cu-Be 合金の境界線における微妙な変化は、合金と金型用鋼材との接触面積を大きく変化させないため、熱交換に対する影響は少ない。同時に、評価関数により得られる値 F の差、および樹脂の表面温度の差の最大値が小さいことから、局所解の違いによる樹脂の表面温度への影響は低いと判断できる。これより、局所的には異なる形状ではあるが、冷却効果としては等価な状態を実現したと見なすことが可能であり、合金の形状に制約条件を与えない場合における本手法の有用性を確認した。

4.4 形状を長方形に制限した場合の自動配置

前節で得られた Cu-Be 合金を金型に使用することは、現状の加工技術のみを用いた場合、非常に困難である。これより、合金の形状を加工しやすい長方形とする制約条件を付与して数値実験を実行する。

図 8 に、初期状態の異なる 2 例に関して、自動配置の過程を示す。形状を長方形とすることによって、収束するまでの時間は、前節と比較して、短くなった。図より確認できる様に、最終的な Cu-Be の合金形状は、初期形状に依存せず、同様な形状となり、評価関数の値 F も同一となった。

樹脂の表面の温度分布は、前節の形状に制約条件を与えない場合と比較して、点 N の近傍で最大 0.19 °C 上昇した。また、キャビティ表面上で、Cu-Be 合金から金型鋼材に変わる境界部分において、温度分布の変化に、最大 0.50 °C 程度の段差的な変化が生じた。これは、境界部分における Cu-Be 合金から鋼材へと急激に熱伝導率が変化したことによって発生したと考えられる。これより、ブロック状の Cu-Be 合金を用いた金型を設計する場合は、この温度変化による成形品の成形性に与える影響を検討する必要がある。

なお、前節の形状に制約条件を与えない場合と比較して、評価関数の値 F は、若干の大きな値を示したことから不均一な冷却状態となったが、合金の使用量は、93.5% を実現した。

また、本論文で示した樹脂表面の冷却均一性の評価に基づいた Cu-Be 合金の配置に関する自動生成の手法は、三次元的な Cu-Be 合金配置へも容易に拡張可能⁸⁾である。

5. 結 言

本論文では、金型の冷却過程における温度変化を非定常熱伝導として数値解析によって求め、樹脂の表面温度分布を用いて、冷却システムによる冷却の均一性を評価する評価関数を提案した。これを使用することで、冷却設計の妥当性の判断に有用であることを確認した。また、金型内の冷却システムの一つである Cu-Be 合金の配置への援用を試み、評価関数

Fig.8 Automatic arrangement with a shape restriction

から得られる値を最小とすることで、その自動生成を可能とする手法を示した。

数値実験の結果より、Cu-Be 合金の使用によって、樹脂の表面の温度分布を均一化する効果を確認した。さらに、自動生成の手法を用いて、金型内に配置された Cu-Be 合金が任意の初期形状から最適な形状を得るための探索を行い、Cu-Be 合金の形状を制約しない場合、ほぼ類似な形状を得ることができた。Cu-Be 合金の形状を長方形に制約した場合においても、初期配置に依存しない最終形状を得られることを確認した。特に、自動生成された Cu-Be 合金は、成形中の樹脂の表面温度分布をより均一化する形状でもあった。同時に、多くの Cu-Be 材質を使ったとしても必ずしも均一な冷却効果を得られないことも明らかになった。

なお今後、Cu-Be 合金と金型用鋼材との間の接触熱抵抗の存在を考慮した方法、および形状の制約のされない Cu-Be 合金を実際の金型へ応用する際の加工上の問題点の解決などが必要となる。これらは、今後の課題である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、御協力を頂いた日本ガイシ株式会社に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本ガイシ株式会社: 技術資料, C7111, ベリリウム合金の特性, (1994).
- 2) 宮本康弘, 河合悟, 安部知和, 鶴原篤彦: 射出金型材料としての Be-Cu 合金, 型技術, 5, 8(1990)98.
- 3) 日原政彦: Be-Cu 系非鉄金型の利用技術, 電気加工学会誌, 35, 79(2001)9.
- 4) P.Engelmann, E.Dawkins, J.Shoemaker, M.Monfore: Improved product quality and cycle times using copper alloy mold cores, Journal of Injection Molding Technology, 1, 1(1997)18.
- 5) 古川康士: ベリリウム銅の有効利用によるハイサイクル金型, プラスチックスエージ, 47, 3(2001)119.
- 6) 例えば, 浜田 修: コストダウンのための金型温度制御, シグマ出版, (1995).
- 7) 例えば, 三谷景造: 射出成形金型, シグマ出版, (1997).
- 8) 高 峰, 是澤宏之, 植原弘之, 鈴木 裕: Cu-Be 合金を用いた射出成形金型の冷却効果の検討, 型技術, 14, 7(1999)54.